

## ТЕМА 4

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.

#### ЛЕКЦИЯ 15. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ,

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

##### 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ.

*Электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для электрификации и автоматизации рабочих процессов.*

Электропривод это электромеханическая система, состоящая из преобразующего, электродвигательного, передаточного и управляющего устройств (рис. 15.1).

*Преобразующее устройство (ПрУ) осуществляет переход от одной физической величины к другой или изменяет масштаб физической величины (напряжения, тока или частоты). Оно может быть выполнено в виде магнитного усилителя, в виде магнитного усилителя с выпрямлением или в виде управляемого выпрямителя на тиристорах и т. д.*

*В электродвигательном устройстве (ЭДУ) происходит преобразование электрической энергии в механическую.*

*Передаточное устройство (ПУ) служит для изменения скорости до значения, необходимого рабочему механизму (РМ). Оно может быть управляемым и неуправляемым. Неуправляемое ПУ выполняется в виде редуктора. Управляемое ПУ представляет собой коробку передач с электромагнит-*

ными муфтами, изменяющими ее передаточное число.

*Управляющее устройство (УУ)* регулирует работу всех блоков электропривода: мощность на валу рабочего механизма, значение и частоту напряжения, передаточное число коробки передач, направление вращения электродвигателя, изменяет схему включения электродвигателя и т.д.

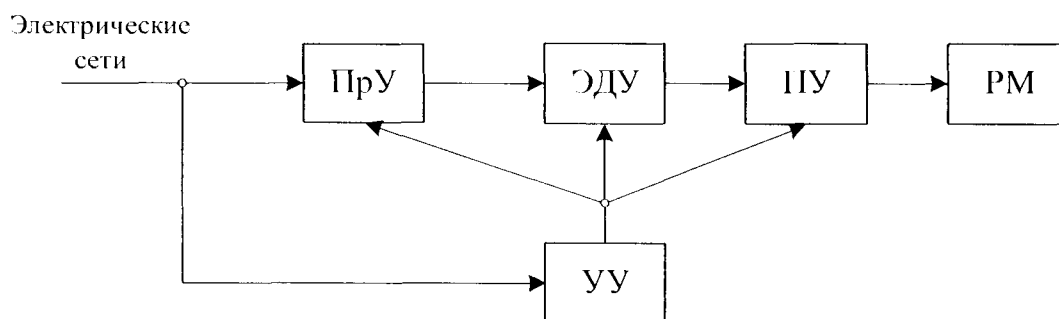


Рис. 15.1. Структура системы электропривода

На практике электропривод бывает *автоматизированный* и *неавтоматизированный*. В автоматизированном электроприводе человек создает только начальное управляющее воздействие (пуск электропривода). В неавтоматизированном – человек периодически управляет работой электропривода.

Электроприводы делят на три группы: *групповые, одиночные, многодвигательные*.

В групповых электроприводах электродвигатель с помощью механической передачи (трансмиссии) приводит в действие несколько рабочих механизмов.

В одиночных электроприводах механизм приводится в действие индивидуальным электродвигателем. При этом все элементы рабочего механизма соединяются с приводным двигателем соответствующими передачами.

В многодвигательных электроприводах каждый орган рабочего механизма снабжен своим двигателем. Так, например, на расточном станке вращение фрезы производится с помощью одного двигателя, продольное пере-

мещение детали – другого, поперечное перемещение – третьего.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины классифицируются по четырем признакам:

- по назначению,
- по роду тока,
- по мощности,
- в зависимости от частоты вращения.

Схема классификации приведена на рис. 15.2. Кратко рассмотрим особенности электрических машин, в зависимости от их принадлежности к признаку классификации.

По назначению электрические машины разделяют на электромашинные генераторы, электродвигатели, электромашинные преобразователи, компенсаторы, усилители и электромеханические преобразователи сигналов.

*Электромашинные генераторы* преобразуют механическую энергию в электрическую. Их применяют на электрических станциях и в различных транспортных средствах. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, измерительной техники, в системах автоматики.

*Электрические двигатели* преобразуют электрическую энергию в механическую. Электрические двигатели приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов.

*Электромашинные преобразователи* преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот. Они изменяют величину напряжения переменного

и постоянного тока, частоту, число фаз и др. параметры.

*Электромашинные компенсаторы* осуществляют генерирование реактивной мощности.



Рис.15.2 Классификация электрических машин

*Электромашинные усилители* применяют для управления большой мощностью с помощью малой мощности, подаваемой на их обмотки управления.

*Электромеханические преобразователи сигналов* генерируют, преобразуют и усиливают различные сигналы. Выполняются, как правило, в виде электрических микромашин. Применяются в системах автоматического ре-

гулирования, измерительных и решающих устройствах в качестве датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов.

По роду тока электрические машины делят на машины переменного и постоянного тока.

*Машины переменного тока*, в зависимости от особенностей электромагнитной системы, подразделяют на асинхронные, синхронные и коллекторные. К ним относятся также трансформаторы, у которых процесс преобразования энергии во многом подобен электрическим машинам.

*Асинхронные машины* используют в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники. В системах автоматического регулирования используют одно и двухфазные асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал, а также сельсины, осуществляющие синхронный поворот или вращение нескольких, не связанных друг с другом механических осей.

*Синхронные машины* применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях, а также в качестве генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.). В качестве электродвигателей синхронные машины применяют в электрических приводах большой мощности. Синхронные машины малой мощности широко применяют в устройствах автоматики.

*Коллекторные машины* переменного тока применяют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Коллекторные машины имеют асинхронное вращение ротора относительно поля, но ввиду наличия у них коллектора они выделяются в отдельный вид. Они имеют

сложную конструкцию и требуют тщательного ухода, поэтому используются сравнительно редко, в основном в устройствах автоматики и электробытовых приборах.

*Машины постоянного тока* применяют в качестве генераторов и электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах. В системах автоматического регулирования машины постоянного тока используются в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

*По мощности* электрические машины условно разделяют на микромашины (мощностью от долей ватта до *500 ватт*), машины малой (от *0,5* до *10 кВт*), средней (от *10* до нескольких сотен киловатт) и большой (свыше нескольких сотен киловатт) мощности.

В зависимости от *частоты вращения* машины условно разделяют на тихоходные (до *300 об/мин*), средней быстроходности (*300 ÷ 1500 об/мин*), быстроходные (*1500 ÷ 6000 об/мин*) и сверхбыстроходные (свыше *6000 об/мин*).

### 3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины обратимы. Это значит, что одна и та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Поэтому можно говорить об устройстве машин, не рассматривая отдельно устройство генератора или двигателя. Однако на практике машины двойного назначения используются редко. Это так называемые стартер-генераторы (машины постоянного тока), которые устанавливаются на некоторых подвижных объектах. В рамках лекции свойством обратимости воспользуемся для анализа физических процессов в электрических машинах, подчеркнуто не увязывая этот анализ с их назначением.

### 3.1. Э.Д.С. в рабочих обмотках электрических машин.

Электрические машины состоят из двух частей. Одна часть неподвижная и называется *статором*. Другая часть – подвижная и называется *ротором*. Статор и ротор выполняются из ферромагнитного материала и образуют магнитопровод с необходимым воздушным зазором.

На статоре и роторе размещают две обмотки. Одна из них служит для создания рабочего магнитного поля машины и называется *обмоткой возбуждения*. В другой обмотке индуцируется Э.Д.С. и создается рабочий ток. Эта обмотка называется *рабочей*.

Работа всех электрических машин основана на электромеханическом взаимодействии магнитного поля и проводника с током. Ток возникает под воздействием Э.Д.С. рабочей обмотки. Рассмотрим принцип формирования Э.Д.С. на примере синхронной машины переменного тока (рис. 15.3, а) и машины постоянного тока (рис. 15.3, б).

В синхронной машине обмотка возбуждения  $I$  размещена на роторе. Она состоит из четырех катушек. Ток в катушках поддерживается внешним источником Э.Д.С. и создает четырехполюсное магнитное поле. На статоре размещены катушки рабочей обмотки  $2$ .

На рис. 15.3, б дан поперечный разрез машины постоянного тока. Здесь обмотка возбуждения находится на статоре. Катушка рабочей обмотки – на роторе.

Таким образом, в машине переменного тока магнитное поле возбуждения вращается относительно рабочей обмотки, а в машине постоянного тока рабочая обмотка вращается в неподвижном магнитном поле возбуждения.

Воздушный зазор машины  $\delta$  обычно на несколько порядков меньше ее осевой длины  $l$ . Поэтому магнитное поле вдоль оси машины можно считать однородным. Части катушки длиной  $l$ , находящиеся в рабочем магнитном поле машины, называют *активными*. Боковые части катушек у торцов маг-

нитепровода называют *лобовыми*.

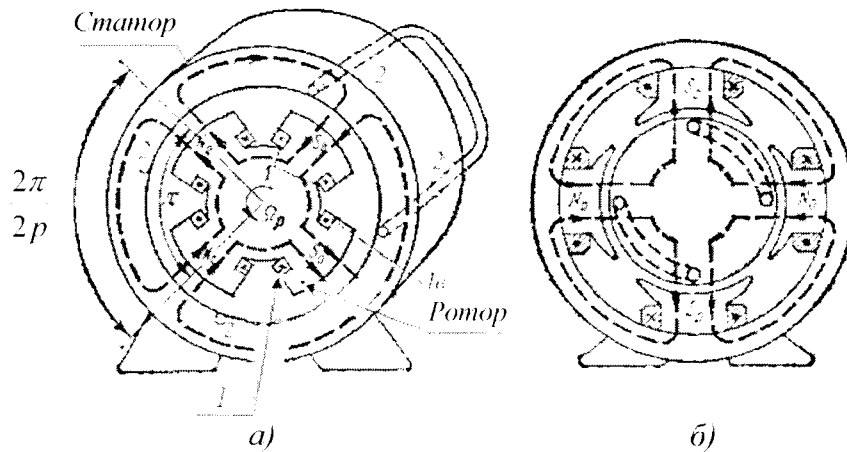


Рис. 15.3. Поперечный разрез синхронной машины (а) и машины постоянного тока (б)

На внутренней поверхности статора образуются полюсы чередующейся полярности (участки, на которых магнитные силовые линии входят в поверхность или выходят из нее). Ширина этих участков обозначается  $\tau$  и называется *полюсным делением*.

Исходя из того, что магнитные линии в зазоре перпендикулярны поверхности статора и ротора, а активные части проводников статора длиной  $l$  перпендикулярны вектору магнитной индукции  $\vec{B}_\delta$ , можем записать

$$e = l \cdot v_{\text{отн}} \cdot B_\delta, \quad (15.1)$$

где  $B_\delta$  – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Из (15.1) следует, что Э.Д.С.  $e$  пропорциональна  $B_\delta$ . Если  $B_\delta$  изменяется по синусоидальному закону, то и  $e$  будет изменяться по синусоидальному закону. Тогда ее действующее значение

$$E = l \cdot v_{\text{отн}} \cdot B_\delta, \quad (15.2)$$

где  $B_\delta$  – действующее значение магнитной индукции в зазоре.

Для расчета Э.Д.С. в рабочей обмотке машин переменного тока удобнее использовать другое известное выражение:



$$e_k = -\frac{d\psi}{dt},$$

где  $e_k$  – Э.Д.С. в замкнутом контуре,  $\psi = \int_S B \cdot dS$  – потокосцепление в контуре,  $S$  – поверхность интегрирования.

В машинах переменного тока распределение магнитной индукции близко к гармоническому. Это эквивалентно движению волны магнитного поля по зазору со скоростью  $\Omega_{\text{омм}}$ . Когда максимум волны  $B$  совпадает с серединой катушки, потокосцепление максимально. Его амплитуда равна:

$$\psi_m = \varpi_k \cdot \Phi_{\text{п}},$$

где  $\varpi_k$  – число витков катушки,  $\Phi_{\text{п}}$  – магнитный поток полюса, причем

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{2}{\pi} \cdot B_m \cdot l \cdot \tau = \text{const.}$$

Если машина имеет  $p$  пар полюсов, то угловая частота Э.Д.С. определяется произведением:

$$\omega = p \cdot \Omega_{\text{омм}}.$$

Учитывая приведенные соотношения и применяя принцип определения Э.Д.С. трансформаторов к машине переменного тока, получим:

$$E_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega \cdot \psi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Omega_{\text{омм}} \cdot \varpi_k \cdot \Phi_{\text{п}}, \quad (15.2a)$$

где  $E_k$  – действующее значение Э.Д.С. катушки.

### 3.2. Электромагнитный момент

Известно, что в однородном магнитном поле на прямолинейный отрезок длиной  $l$  с постоянным током  $I$  действует сила  $F$ , причем:

$$\vec{F} = \vec{B} \cdot l \cdot I. \quad (15.3)$$

В (15.3) предполагается, что вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярен направлению тока.

В электрических машинах проводники рабочей обмотки уложены в

пазы статора или ротора. Они окружены ферромагнитной средой. Поэтому магнитное поле возбуждения действует на микротоки, протекающие по поверхности пазов. Линейная плотность этих токов, в оговоренных выше условиях, примерно равна  $I$ . Поэтому для машин постоянного тока выражение (15.3) справедливо. Для действующего значения магнитной индукции  $B_{\delta}$  оно принимает вид:

$$F = l \cdot B_{\delta} \cdot I. \quad (15.4)$$

В машинах переменного тока  $i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$  проводник находится в поле магнитной индукции  $B(t) = B_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varepsilon)$ . Здесь  $\varepsilon$  – угол сдвига фаз между магнитной индукцией и током. Электромагнитная сила, действующая на проводник, периодически изменяется с удвоенной частотой:

$$\begin{aligned} f(t) &= l \cdot B(t) \cdot i(t) = l \cdot B_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varepsilon) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot l \cdot B_m \cdot I_m \cdot [\cos \varepsilon - \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \varepsilon)]. \end{aligned}$$

Среднее значение электромагнитной силы (постоянная составляющая) определяется выражением:

$$F_{cp} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot B_m \cdot I_m \cdot \cos \varepsilon = l \cdot B_{\delta} \cdot I \cdot \cos \varepsilon. \quad (15.5)$$

Постоянная составляющая электромагнитной силы зависит от сдвига по фазе синусоидального тока и магнитной индукции, а также от действующих значений  $B_{\delta}$  и  $I$ . Произведение  $I \cdot \cos \varepsilon$  определяет активную составляющую тока  $I_a$ . Значит, постоянная составляющая электромагнитных сил в машинах переменного тока, пропорциональна активной составляющей тока в рабочей обмотке:

$$F_{cp} = l \cdot B_{\delta} \cdot I_a. \quad (15.6)$$

Электромагнитный момент  $M$ , действующий на ротор диаметром  $D$ , равен сумме моментов сил, приложенных к  $N$  проводникам его обмоток:

$$M = \sum_{i=1}^N \frac{D}{2} \cdot F_{cpi} \cdot \quad (15.7)$$

### 3.3. Преобразование энергии в электрических машинах

Процесс преобразования энергии в электрических машинах рассмотрим на простейшем макете по рис. 15.4. В макете двигателя постоянного тока (рис. 15.4, а) рабочий ток  $I$ , созданный источником постоянной Э.Д.С.  $E_{\text{вн}}$ , замыкается по направляющим 1, 2 и поперечному прутку 3. Цепь находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном прутку, который может катиться по направляющим. На пруток действует сила по (15.3). Она уравновешивается внешней силой  $-F_{\text{вн}}$ , т. е.

$$F = F_{\text{вн}}.$$

Если при этом пруток движется со скоростью  $v$ , то за время  $dt$  совершается механическая работа

$$A = F \cdot v \cdot dt.$$

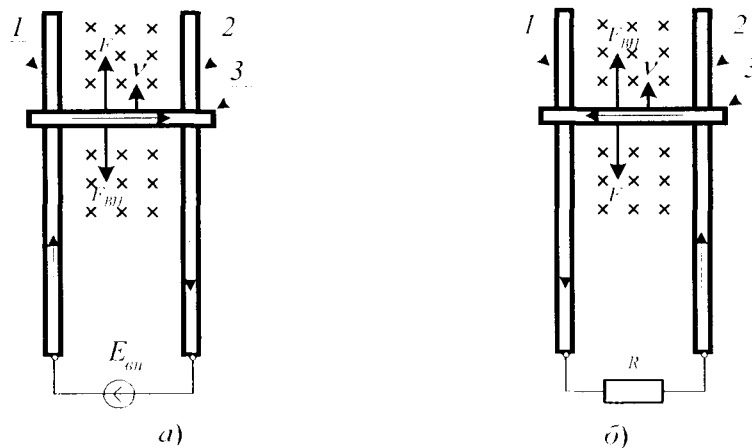


Рис. 15.4. Макеты электрического двигателя (а) и генератора (б) постоянного тока

Таким образом, произошел процесс преобразования электрической энергии источника в механическую энергию движения прутка. Часть энергии теряется на теплоту в проводниках с сопротивлением  $r$ . Баланс энергий определяется выражением:

$$E_{\text{вн}} \cdot I \cdot dt = r \cdot I^2 \cdot dt + F \cdot v \cdot dt. \quad (15.8)$$

Подставляя в (15.8) значение  $F$  из (15.4) и учитывая (15.2), получим:

$$E_{\text{сн}} \cdot I = r \cdot I^2 + E \cdot I, \quad (15.9)$$

где  $E_{\text{сн}} \cdot I = P_{\text{эл}}$ ,  $r \cdot I^2 = \Delta P_{\text{эл}}$  – потери энергии на теплоту,  $E \cdot I$  – электромагнитная мощность.

Электромагнитная мощность определяется выражением:

$$P_{\text{эл}} = E \cdot I = l \cdot B \cdot v \cdot I = F_{\text{сн}} \cdot v \quad (15.10)$$

и характеризует скорость преобразования электрической энергии в механическую.

Для макета генератора (рис. 15.4, б) после аналогичных действий можно получить выражение:

$$F_{\text{сн}} \cdot v = r \cdot I^2 + R \cdot I^2, \quad (15.11)$$

где  $F_{\text{сн}} \cdot v = l \cdot B \cdot I \cdot v = P_{\text{эм}}$ .

Процесс преобразование энергии в машинах переменного тока аналогичен. Отличие заключается в том, что цепи рис. 15.4 будут находиться в переменном магнитном поле, которое будет изменяться вдоль направляющих по гармоническому закону. В выражениях для электромагнитной мощности необходимо использовать действующие значения магнитной индукции и тока.

Оценивая работу электрических машин, нужно учитывать потери энергии. Общие потери складываются из потерь на нагрев проводов, потерь в магнитопроводе и механических потерь. Качество машин оценивается коэффициентом полезного действия –  $\eta$ . Для электродвигателя

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}},$$

а для генератора

$$\eta = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}}.$$

При номинальной нагрузке КПД электрических машин достигает  $(70 \div 99)\%$ .

#### 4. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Движущиеся магнитные поля широко используют в разных областях техники. Во многих механизмах с линейным движением используют бегущее вдоль заданной прямой магнитное поле. Такое поле создают в электромагнитных насосах для электропроводных жидкостей. В таких насосах отсутствуют движущиеся части. Движение жидкости происходит в результате взаимодействия бегущего магнитного поля на токи, индуцированные этим полем в жидкости.

В большинстве электрических машин переменного тока вращающееся магнитное поле токов статора заставляет вращаться ротор. Явление вращающегося магнитного поля было открыто в 1888 г. Г. Феррарисом и Н. Тесла. Было предложено много конструкций двигателей, использующих вращающееся магнитное поле. Но лучшей стала конструкция, разработанная М. О. Доливо–Добровольским. Рассмотрим принцип формирования вращающегося магнитного поля.

Простейшая однофазная обмотка статора в виде четырех последовательно соединенных проводников приведена на рис. 15.5. Эти проводники можно рассматривать как две последовательно соединенные одновитковые катушки. Активные части проводников уложены в пазы статора и соединены лобовыми частями обмотки.

Обмотку и ее магнитное поле удобно рассматривать на развертке машины (рис.15.6, а). На развертке кольцевой воздушный зазор между статором и ротором представлен линейным.

Пусть обмотка подключена к источнику переменного тока:

$$i(t) = I_m \cdot \cos \omega t.$$

Пусть также в момент времени  $t = 0$  ток в обмотке имеет указанное на рис. 15.6, а направление. Ток в проводниках образует поле, магнитные линии которого изображены на рис. 15.6, б. На поверхности статора и ротора образуются чередующиеся северные и южные полюсы. Ширина каждого полюса  $\tau$  равна шагу обмотки (расстоянию между сторонами катушек с противоположным направлением токов). Ширина полюса  $\tau$ , общее число полюсов  $2p$  и диаметр статорной расточки  $D_{cm}$ , связаны соотношением:

$$2p\tau = \pi D_{cm}. \quad (15.12)$$

Если пренебречь магнитным сопротивлением ферромагнитных участков магнитной цепи машины, то закон полного тока принимает вид:

$$2\delta H_\delta = I,$$

где  $H_\delta$  – напряженность магнитного поля в зазоре,  $\delta$  – ширина зазора.

Магнитная индукция в зазоре определяется известным выражением

$$B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\delta}. \quad (15.13)$$

Кривая распределения магнитной индукции в зазоре  $B(x)$  вдоль статорной расточки построена на рис. 15.6, в. Представив прямоугольную кривую рядом Фурье и ограничиваясь первой гармоникой, можно записать аналитическое выражение закона распределения магнитной индукции:

$$B(x) \approx B_{(1)}(x) = B_{(1)m} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right), \quad (15.14)$$

где  $\lambda = \pi D_{cm}/2$ .

Амплитуда первой гармоники  $B_{(1)m}$  не остается постоянной. Она пульсирует вместе с током:

$$B(t, x) \approx B_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right). \quad (15.15)$$

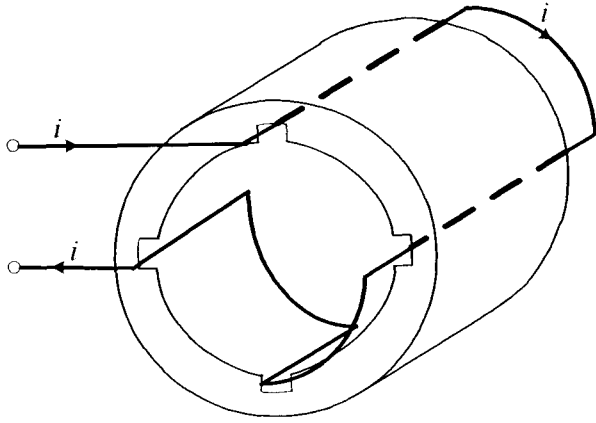


Рис. 15.5. Простейшая однофазная обмотка статора

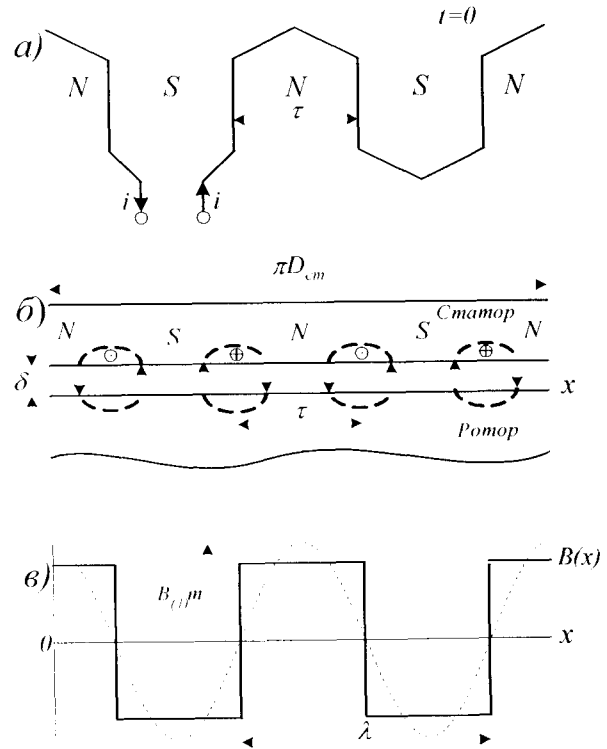


Рис. 15.6. Развертка обмотки статора (а), магнитное поле токов обмотки (б), распределение магнитной индукции в воздушном зазоре (в)

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины по рис. 15.6 для различных моментов времени изображено на рис. 15.7. Это стоячая волна. Для такой волны характерны неподвижность узлов (точек, в которых  $B = 0$ ) и непрерывная пульсация амплитуды по гармоническому закону.

Известно, что стоячая волна представляет совокупность двух бегущих волн – прямой и обратной. Выражение для прямой и обратной волн получают из (15.15), применив к нему тригонометрические преобразования:

$$B(t, x) = \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos(\omega \cdot t - 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}) + \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos(\omega \cdot t + 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}). \quad (15.16)$$

Для определения скорости бегущей волны нужно найти производную

$dx/dt$  из уравнения  $(\omega \cdot t \pm 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}) = const$ , определяющего постоянство фазы колебания. Тогда получим:

$$v = \frac{dx}{dt} = \pm \frac{\omega \cdot \lambda}{2\pi} = \pm \frac{\omega \cdot \tau}{\pi} = \pm f \cdot \lambda. \quad (15.17)$$

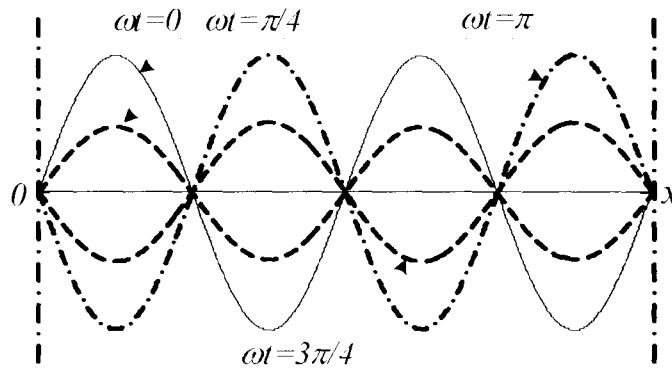


Рис. 15.7. Стоячая волна магнитной индукции в зазоре машины с однофазной обмоткой

В (15.17) знак «+» показывает, что движение волны совпадает с положительным направлением отсчета оси  $X$ . Знак «-» означает, что волна движется в обратном направлении. Следовательно, первое слагаемое выражения (15.16) представляет прямую волну магнитной индукции в воздушном зазоре, а второе – обратную. Скорость волны пропорциональна частоте тока в катушке  $\omega$  и ширине катушек  $\tau$ .

Если одну из волн подавить, то оставшаяся волна обеспечит вращение ротора. Для подавления одной из волн применяют двухфазную обмотку. Развертка такой обмотки приведена на рис. 15.8, а. Катушки фаз смещены в пространстве на половину полюсного деления  $\tau$ , т. е. на  $\tau/2$ . Токи в фазах обмотки сдвинуты на угол  $\pi/2$  (рис. 15.8, б). Амплитуды токов одинаковы. В этом случае волны фаз описываются выражениями:

$$B_1(t, x) = B_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\pi \cdot \frac{x}{\tau});$$



$$B_2(t, x) = B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{x}{\tau} - \frac{\pi}{2}\right).$$

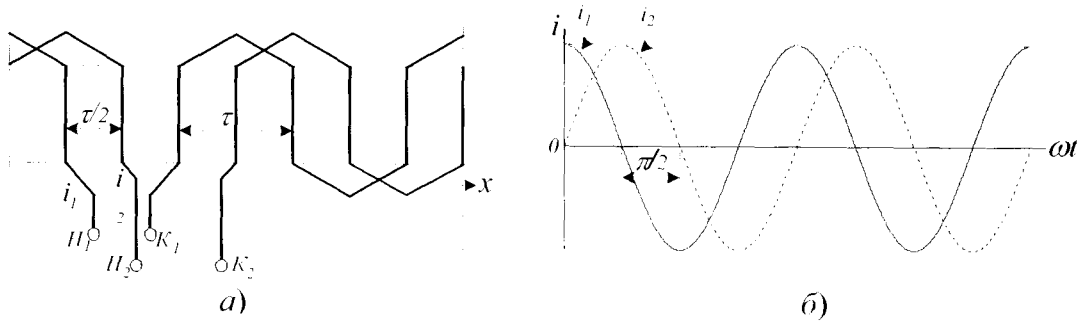


Рис. 15.8. Развертка двухфазной обмотки статора (а) и кривые мгновенных токов в фазах обмотки (б)

Их преобразование в бегущие волны имеет вид:

$$B_1(t, x) = \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right) + \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right);$$

$$B_2(t, x) = \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right) + \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \pi \cdot \frac{x}{\tau} - \pi\right).$$

Видим, что прямые волны складываются, а обратные компенсируют друг друга. В воздушном зазоре остается одна прямая волна:

$$B(t, x) = B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right).$$

Чтобы изменить направление вращения поля, достаточно изменить фазу одного из токов на  $\pi$ .

Трехфазную обмотку соединяют звездой или треугольником и подключают к трехфазному источнику Э.Д.С. Аналитическое выражение для бегущей волны трехфазной обмотки можно получить путем аналогичных преобразований. Оно имеет вид:

$$B(t, x) = \frac{3}{2} \cdot B_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right).$$

Из последнего выражения видим, что амплитудное значение бегущей волны увеличилось в полтора раза.